

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS FLEXÍVEIS MULTI-APOIADAS USANDO MODELOS VISCOELASTOPLÁSTICOS

SEISMIC ANALYSIS OF MULTI-BRACED FLEXIBLE WALLS USING VISCOELASTOPLASTIC MODELS

Ambrósio, António, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, aambrosio@cenorgeo.pt*
Santos, Jaime, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt*
Brito, J. Mateus, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, mbrito@cenorgeo.pt*

RESUMO

A presente comunicação aborda o comportamento sísmico de estruturas de suporte flexíveis multi-apoiadas, tendo por base análises numéricas realizadas através do método dos elementos finitos no domínio do tempo, recorrendo a um modelo viscoelastoplástico. No caso em estudo considerou-se uma escavação com 8,4 m de profundidade, disposta de paredes de contenção travadas por dois níveis de escoras.

ABSTRACT

This work's main purpose is to understand the seismic behaviour of multi-braced flexible walls, based on numerical analysis using the finite element method in time domain. It was used a viscoelastoplastic model. An excavation with depth of 8,4 m was analysed, supported by flexible walls with two levels of struts.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento sísmico de estruturas de contenção flexíveis não tem merecido o mesmo interesse que tem sido dedicado a outras estruturas geotécnicas, apesar de, nos últimos anos, se ter vindo a verificar um crescente recurso a estruturas deste tipo. Estas obras têm assumido proporções cada vez maiores, abrangendo grandes áreas e atingindo profundidades muito consideráveis, por vezes em zonas de elevada sismicidade e simultaneamente grande densidade populacional.

Esta comunicação pretende dar um contributo para uma melhor compreensão do comportamento de estruturas de suporte flexíveis multi-apoiadas face às acções sísmicas, através de análises numéricas efectuadas através do método dos elementos finitos no domínio do tempo, neste caso com recurso ao programa Plaxis, modelando a interacção solo-estrutura. Utilizou-se um modelo viscoelástico com plasticidade perfeita, que será designado por viscoelastoplástico. O amortecimento viscoso é do tipo Rayleigh, tendo-se adoptado o critério de rotura de Mohr-Coulomb.

O mesmo tema foi abordado por Ambrósio *et al.* [1], recorrendo a análises numéricas efectuadas através do método dos elementos finitos no domínio da frequência, com o programa Flush [3], utilizando um modelo viscoelástico linear com amortecimento hysterético. Sempre que considerado pertinente, nesta comunicação estabelecem-se comparações com os resultados obtidos com o Flush.

2. SITUAÇÃO DE CÁLCULO ANALISADA

A situação cuja análise sísmica se apresenta (Figura 1) consiste numa escavação com uma altura total de 8,4 m, suportada por paredes em betão armado escoradas a dois níveis (profundidades de 2,3 m e 5,3 m). O substrato rígido foi considerado a uma profundidade de 19,8 m.

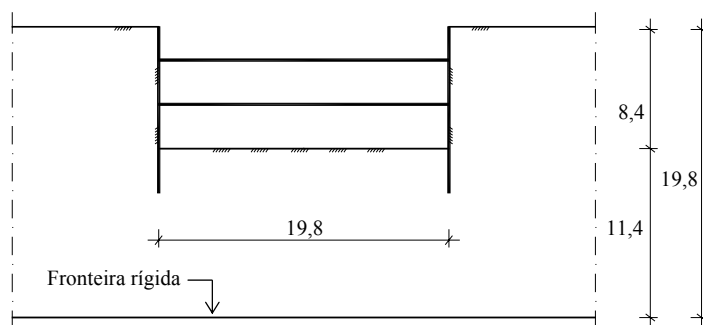


Figura 1 - Situação analisada

Admitiu-se um terreno homogéneo, atrítico e sem água, tendo-se adoptado as curvas de variação do amortecimento hysterético e da rigidez, em função da distorção, que se apresentam na Figura 2. Estas curvas foram obtidas com base na formulação de Ishibashi e Zhang [2], a partir do índice de plasticidade e da tensão efectiva média do solo. Para o cálculo das tensões “in situ” definiu-se o terreno como normalmente consolidado, com um ângulo de atrito interno de 35°, donde resultou um valor de 0,426 para o coeficiente de impulso em repouso (médio para toda a camada). Para o cálculo da tensão efectiva média na camada admitiu-se um peso volúmico de 20 kN/m³ e tensões horizontais iguais em ambas as direcções.

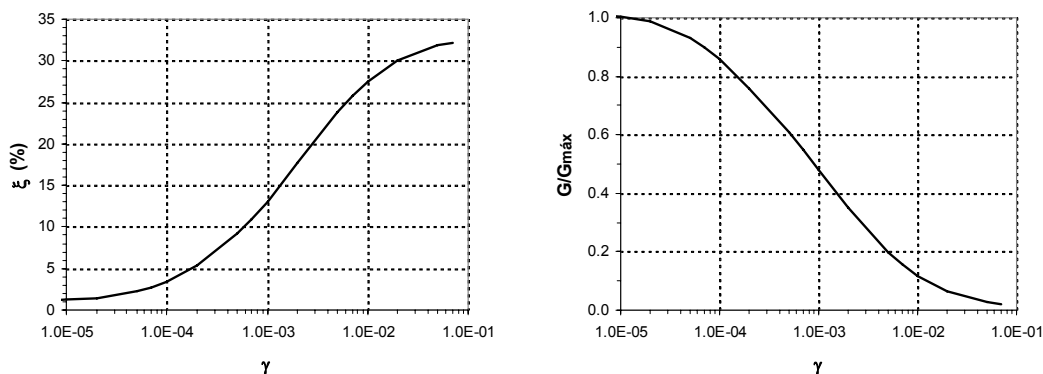


Figura 2 - Curvas de variação da rigidez e do amortecimento em função da distorção

Conforme já referido, o amortecimento considerado no Plaxis é do tipo Rayleigh, sendo este proporcional à massa (M) e à rigidez (K) do sistema, de acordo com:

$$C = a_0 \cdot M + a_1 \cdot K \quad (1)$$

Na equação (1), C representa o amortecimento do sistema, sendo a_0 e a_1 os coeficientes de Rayleigh relativos à massa e à rigidez do referido sistema, respectivamente. Estes coeficientes podem determinar-se a partir de dois modos de vibração quaisquer (n), para os quais se conheça a frequência angular (ω_n) e o amortecimento (ξ_n), através de:

$$a_0 + a_1 \cdot \omega_n^2 = 2 \cdot \omega_n \cdot \xi_n \quad (2)$$

De acordo com Santos [6], no caso da resposta dum camada viscoelástica, os coeficientes de Rayleigh podem relacionar-se com o amortecimento hysterético (ξ) e com a frequência angular relativa ao primeiro modo de vibração (ω_1) através de:

$$\{a_0; a_1\} = \left\{ \frac{5}{3} \cdot \xi \cdot \omega_1; \frac{1}{3} \cdot \frac{\xi}{\omega_1} \right\} \quad (3)$$

Para analisar a resposta com diferentes níveis de amortecimento e de rigidez efectuaram-se cálculos para duas situações, com módulos de distorção de 30 e 90 MPa (análises G30 e G90, respectivamente), tendo-se admitido $G_{\text{máx}} = 120$ MPa e $\nu = 0,30$. No Quadro 1 apresentam-se as características consideradas, incluindo os parâmetros relativos à modelação do amortecimento tipo Rayleigh, admitindo como frequência própria de vibração a correspondente ao campo livre.

Quadro 1 - Características do terreno

Características		G30	G90
Deformabilidade	G (MPa)	30	90
	v_s (m/s)	121,2	210,0
Resistência	ϕ' (°)	35	35
	c' (kPa)	0	0
Amortecimento hysterético (ξ)		0,21	0,06
Distorção	γ ($\times 10^{-3}$)	3,5	0,25
Frequência	ω_1 (rad/s)	9,62	16,65
Amortecimento tipo Rayleigh	a_0	3,3663	1,6650
	a_1	0,0073	0,0012

3. DEFINIÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA

A acção sísmica foi definida de acordo com o RSAEEP [4], tendo-se considerado a acção tipo 1, para terreno tipo I e para a zona sísmica A, com acelerogramas gerados artificialmente.

Para o efeito, de acordo com o descrito por Santos *et al.* [5], procedeu-se à geração de séries estacionárias a partir das densidades espectrais de potência do RSAEEP, assumindo que as vibrações sísmicas podem ser representadas por um processo estocástico, estacionário e gaussiano. Assim, o acelerograma considerado (Figura 3), correspondente a um período de retorno de 1000 anos, tem uma aceleração máxima de 0,185 g ($t = 4,790$ seg) e uma duração total de 10 s (discretização de 2000 pontos, com um intervalo de 0,005 s).

Sendo importante considerar um período de estabilização das vibrações do sistema, uma vez terminada a acção sísmica, acrescentaram-se pontos de aceleração nula ao sinal gerado, dando tempo para a actuação do amortecimento do sistema. Assim sendo, o sinal foi introduzido no modelo numérico com um total de 4096 pontos de discretização (duração total de 20,48 s).

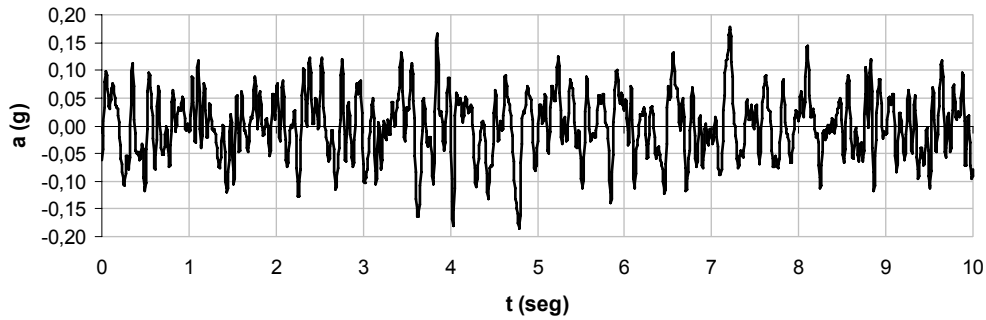


Figura 3 - Acelerograma gerado artificialmente

É ainda de referir que o acelerograma considerado nos cálculos foi corrigido, de forma a evitar a geração de deslocamentos excessivos e irrealistas ("*baseline correction*").

4. ANÁLISES EFECTUADAS

4.1 Considerações gerais

O Plaxis resolve a equação do movimento de forma incremental no tempo (passo a passo), sendo a integração numérica efectuada pelo método de Newmark, o que permite incorporar diversos modelos constitutivos, inclusive com plasticidade:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (4)$$

Na equação (4), $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, sendo $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ e $\{u\}$ os vectores de acelerações, velocidades e deslocamentos (relativos à base da malha). O vector de forças, que inclui as acelerações absolutas na base, é designado por $\{F\}$.

O Plaxis permite modelar a interacção terreno-estrutura, com a particularidade de se poderem considerar os resultados das fases estáticas que precedem a fase dinâmica. No entanto, é de salientar que, nesta comunicação, apenas se apresentam os resultados relativos à fase dinâmica, pelo que estes devem ser encarados como acréscimos (ou decréscimos, consoante os sinais) face aos estáticos. A malha de elementos finitos que foi utilizada apresenta-se na Figura 4, sendo de referir que, relativamente às condições de fronteira, ambas as faces laterais da malha foram dotadas de capacidade de transmissão de energia das ondas sísmicas, através da consideração de amortecedores viscosos. O acelerograma foi aplicado ao nível da base.

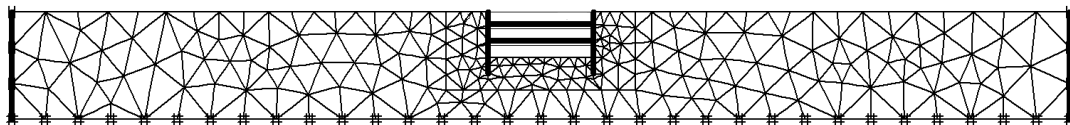


Figura 4 – Malha de elementos finitos adoptada

4.2 Acelerações e deslocamentos ao longo do tempo

Na Figura 5 e na Figura 6 representam-se as acelerações horizontais (a_x) e os deslocamentos horizontais (u_x) no topo da parede (valores relativos à base da mesma). Estes valores traduzem a evolução da resposta ao longo do tempo, para as análises G30 e G90, respectivamente.

Em relação às análises G30 e G90, os instantes em que ocorre o valor máximo do deslocamento relativo no topo da parede são de 7,393 s e 4,895 s, respectivamente. Como pode constatar-se para o topo da parede, na análise G90 obtiveram-se plastificações significativas, verificando-se, no final, a ocorrência dum deslocamento permanente de cerca de 0,36 cm. Esse fenómeno é menos importante para a análise G30, sendo o deslocamento permanente de 0,11 cm.

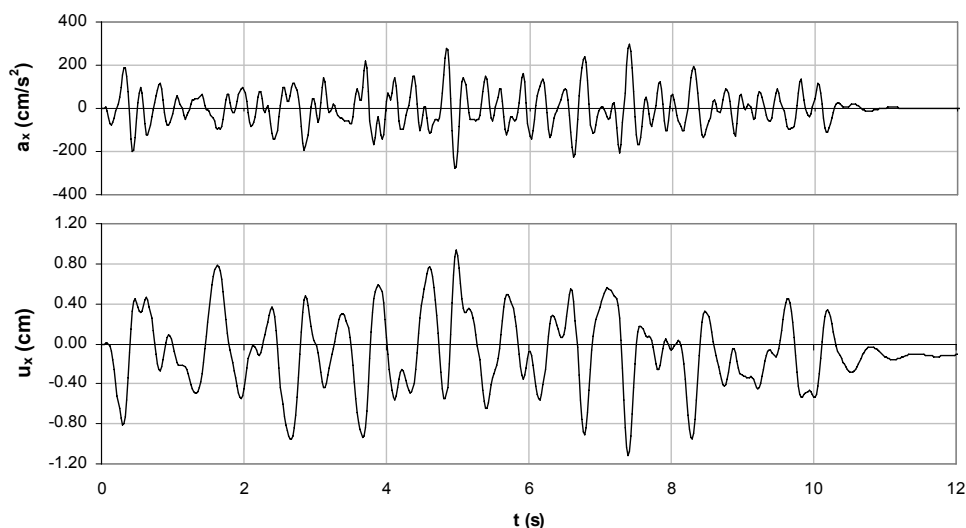


Figura 5 - Acelerações e deslocamentos dinâmicos no tempo, no topo da parede (G30)

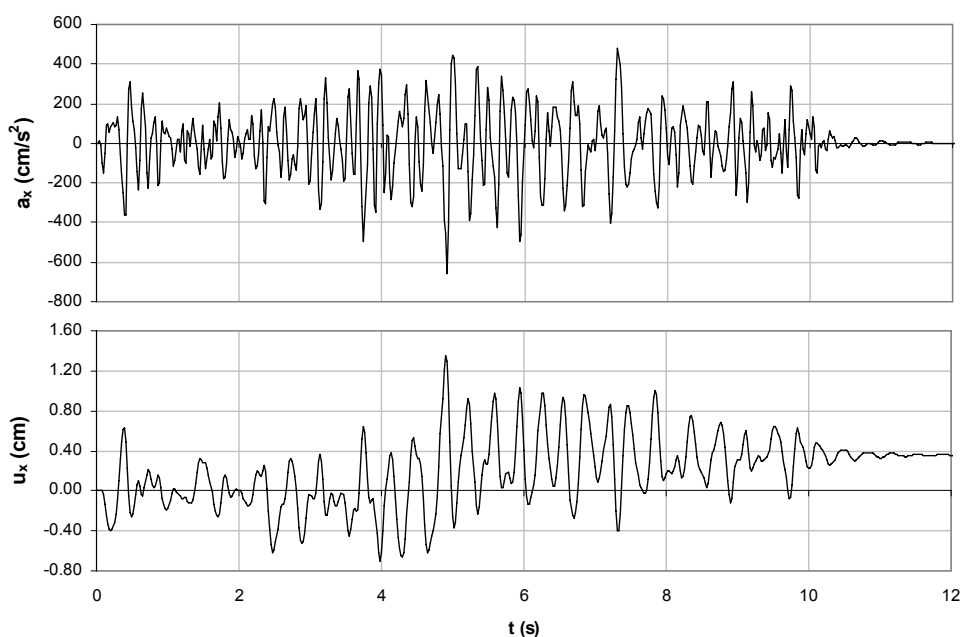


Figura 6 - Acelerações e deslocamentos dinâmicos no tempo, no topo da parede (G90)

Na Figura 7 apresentam-se as deformadas nos instantes em que ocorrem os deslocamentos relativos máximos no topo, em simultâneo com os esforços mais importantes na parede. É de salientar que, contrariamente ao que sucede nas análises viscoelásticas, em que os deslocamentos absolutos das paredes são iguais em cada instante, nos casos em que há plastificação do terreno tal deixa de ser verdade, ficando as escoras sujeitas a deslocamentos relativos das suas extremidades que não são desprezáveis.

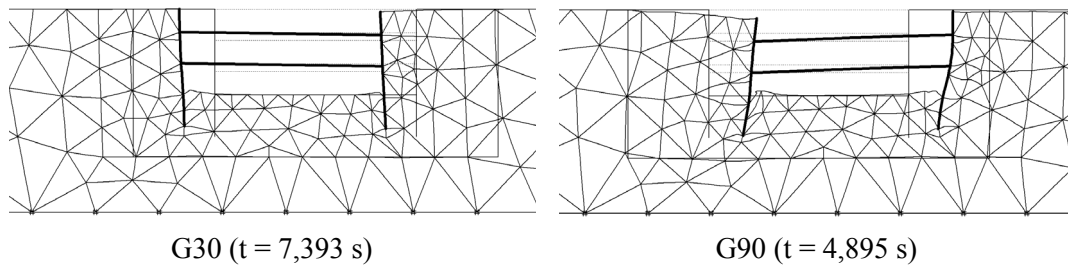


Figura 7 - Deformadas associadas aos deslocamentos relativos máximos no topo da parede

Na Figura 8 apresentam-se as acelerações absolutas máximas na parede (em módulo) para as análises viscoelastoplástica (Plaxis) e viscoelástica (Flush), em relação às análises G30 e G90.

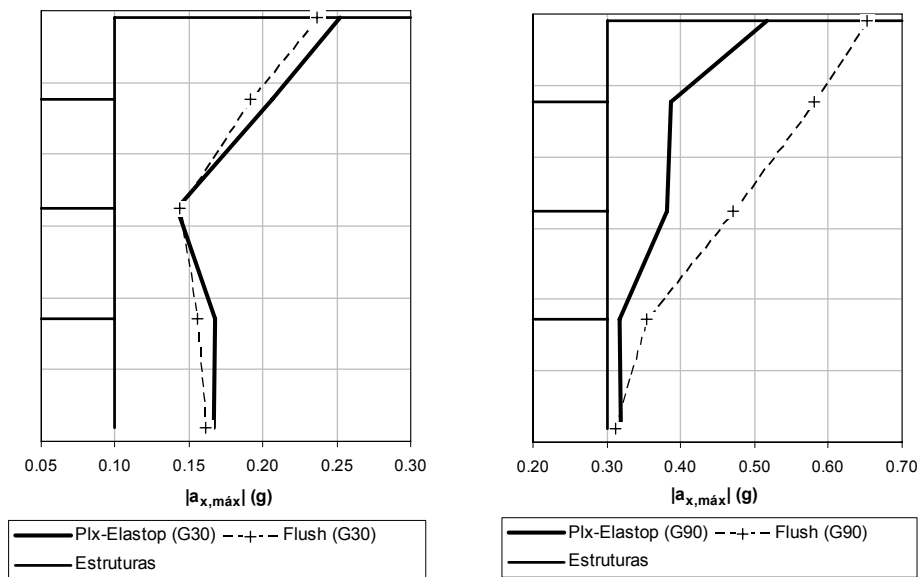


Figura 8 - Acelerações máximas na parede

Para a análise G30, as acelerações obtidas nas análises viscoelástica e viscoelastoplástica são da mesma ordem de grandeza (0,236 g vs. 0,252 g, no topo). Na análise G90 obtiveram-se com a análise viscoelástica valores superiores à viscoelastoplástica (0,652 g vs. 0,517 g, no topo), tendo as plastificações conduzido a uma degradação da rigidez e a um aumento do amortecimento na zona das escoras, com a consequente redução das acelerações.

4.3 Esforços na parede e nas escoras

Na Figura 9 e na Figura 10 apresentam-se as envolventes dos esforços dinâmicos na parede, respectivamente para as análises G30 e G90, em comparação com os resultados das análises viscoelásticas do Flush. Os resultados mais relevantes encontram-se resumidos no Quadro 2, para três secções da parede (ao nível das escoras e ao nível da base da escavação), sendo que, no caso da análise G90, os esforços são muito superiores aos da análise G30.

É de referir que, para determinar as envolventes dinâmicas dos esforços que se apresentam do Plaxis (versão 8), foi necessário subtrair a envolvente estática às envolventes positiva e negativa que o programa fornece (estática + dinâmica). Assim, se não houver mudança de sinal dos esforços, não é possível conhecer a envolvente dinâmica quando esta é inferior à estática – daí que na Figura 9 e na Figura 10 algumas envolventes do Plaxis apresentem um aspecto irregular.

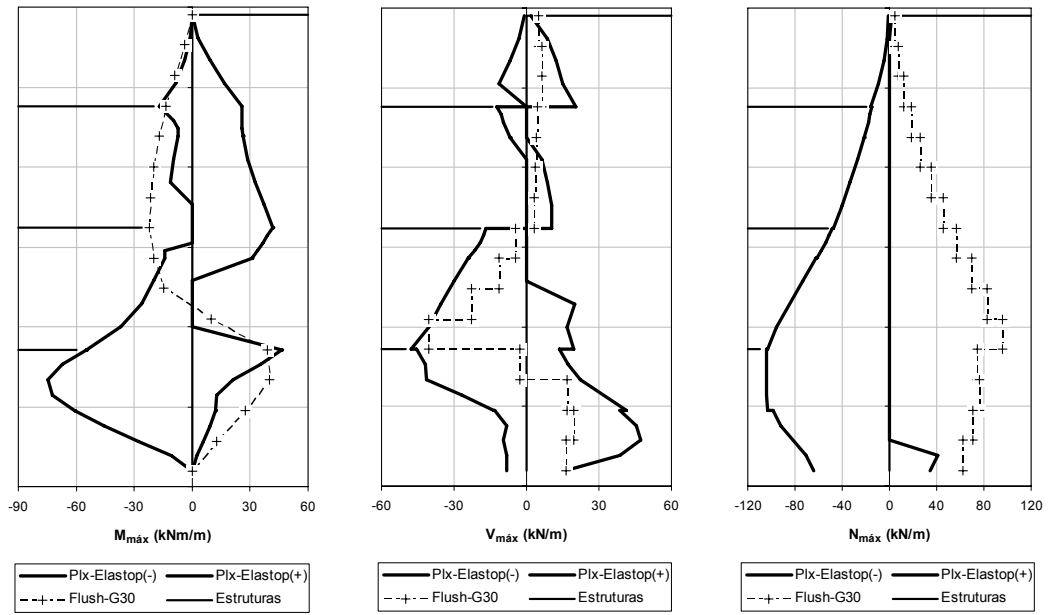


Figura 9 - Envoltentes dos esforços dinâmicos na parede (G30)

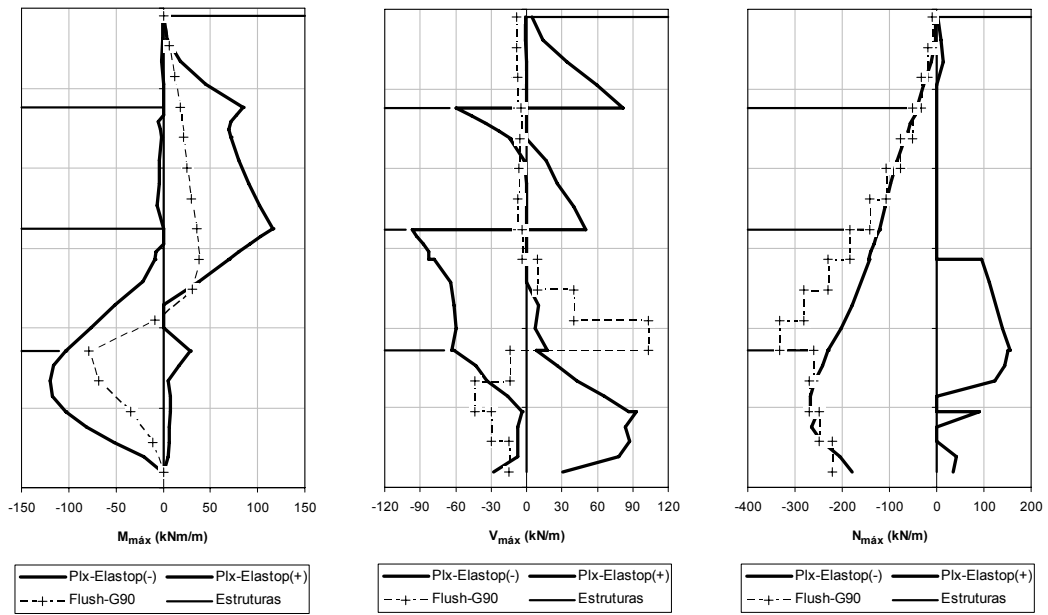


Figura 10 - Envoltentes dos esforços dinâmicos na parede (G90)

Quadro 2 - Esforços dinâmicos máximos na parede

Esforços	Modelo constitutivo	Secção da parede					
		Escora superior		Escora inferior		Base escavação	
		G30	G90	G30	G90	G30	G90
M (kNm/m)	Viscoelastoplástico (Plx)	16,7	84,7	41,6	115,7	46,2	119,5
	Viscoelástico (Flush)	13,6	18,0	22,1	35,8	40,2	78,6
V (kN/m)	Viscoelastoplástico (Plx)	20,6	81,8	16,9	96,7	47,7	92,6
	Viscoelástico (Flush)	4,7	7,2	3,2	7,5	40,3	103,5

Comparando os resultados do modelo viscoelastoplástico com os do viscoelástico, os esforços da análise G30 são globalmente da mesma ordem de grandeza. Para a análise G90 já o cenário é diferente, com os esforços a aumentarem significativamente no caso do modelo viscoelastoplástico (excepto ao nível da base da escavação, em que são idênticos).

Na Figura 11 apresentam-se os resultados relativos às escoras do nível superior, para as análises G30 e G90 – para o nível inferior as conclusões são semelhantes. Como pode verificar-se em ambos os casos, o modelo viscoelastoplástico fornece valores substancialmente superiores aos do viscoelástico, da ordem de 8 a 15 vezes – tal deve-se aos deslocamentos relativos das extremidades a que as escoras são sujeitas quando há plastificações no terreno (inexistentes em análises viscoelásticas, dado que as deformadas de ambas as paredes são iguais em cada instante), originando esforços que têm de ser adicionados aos provocados pelas forças de inércia.

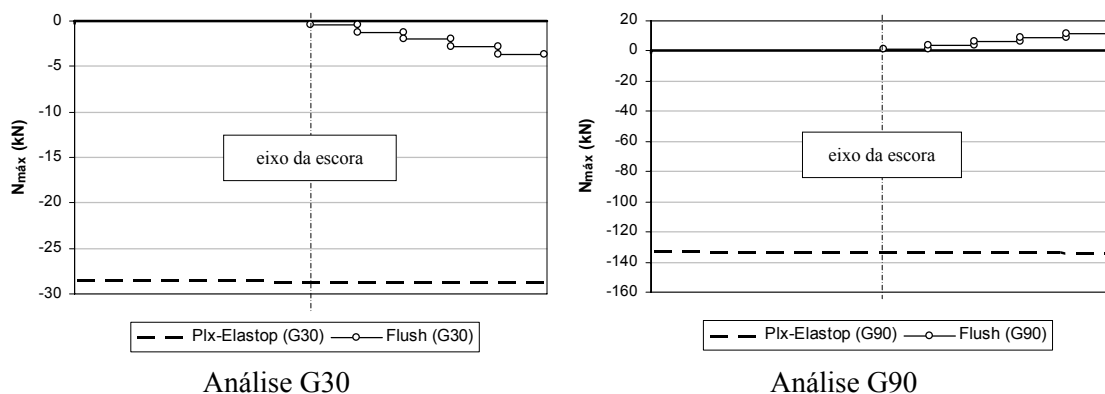


Figura 11 - Envoltórios dos esforços axiais dinâmicos no nível superior de escoras

4.4 Plastificações induzidas no terreno

Na Figura 12 apresentam-se, para as análises G30 e G90, os pontos de plastificação no terreno relativos aos instantes em que ocorrem os deslocamentos relativos máximos no topo da parede.

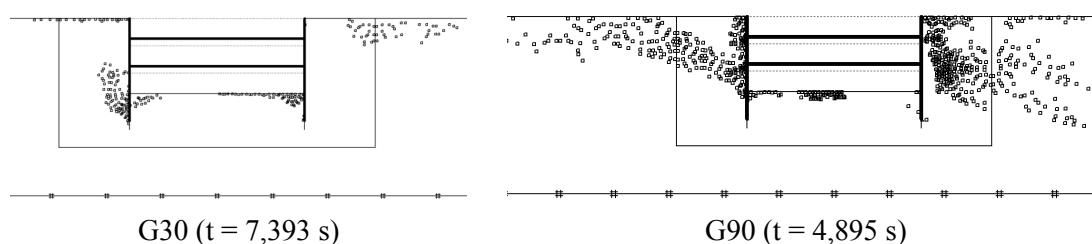


Figura 12 - Pontos de plastificação no terreno

No caso da análise G30 pode verificar-se que ocorre muito pouca plastificação no terreno, o que justifica o facto dos esforços na parede não serem muito diferentes na análise viscoelástica e na análise viscoelastoplástica. Nas escoras há efectivamente um aumento do esforço axial, devido à ocorrência de deslocamentos relativos, embora reduzidos, entre as extremidades. Em contraposição, para a análise G90 verifica-se que há zonas de plastificação generalizada no terreno, o que conduz a esforços muito superiores, quer na parede, quer nas escoras.

De facto, o aumento dos esforços na parede e nas escoras depende fortemente do nível de plastificação induzido pela acção sísmica no terreno, sendo a análise G90 a mais desfavorável.

Considerando um elemento infinitesimal de terreno sujeito a plastificação, verifica-se que esta ocorre geralmente devido ao facto da acção sísmica introduzir tensões tangenciais nas facetas horizontal e vertical, sendo que as tensões normais a essas facetas são também principais na fase estática. Assim sendo, as tensões de corte aumentam substancialmente na fase dinâmica.

Na Figura 13 apresentam-se as direcções principais das tensões no terreno, correspondentes à análise G90, para o instante de tempo $t = 4,895$ s. Conforme pode constatar-se, na zona superior do terreno, na zona de influência da parede direita, cujo deslocamento é da esquerda para a direita (Figura 7), as tensões horizontais são muito maiores que as verticais, o que é típico dum estado passivo. Com efeito, constata-se que o terreno junto à parede direita, para além de estar globalmente plastificado, se encontra próximo do estado passivo, o que está de acordo com o facto do deslocamento da parede ser superior ao do campo livre na zona acima do nível inferior de escoras, induzindo por isso um aumento das tensões horizontais.

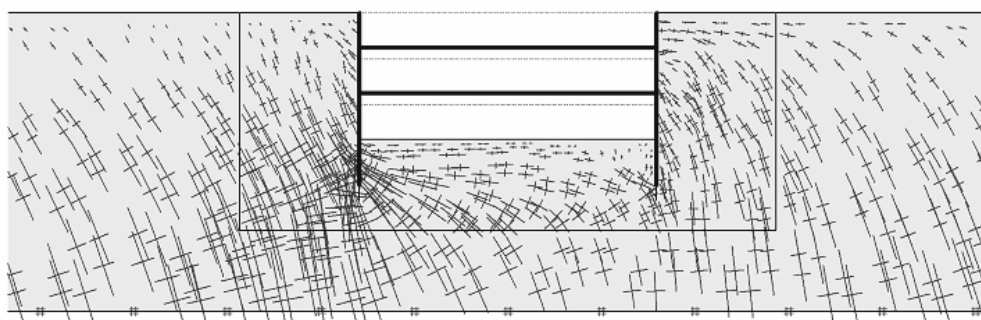


Figura 13 – Direcções principais das tensões no terreno, para $t = 4,895$ s (G90)

5. CONCLUSÕES

Na presente comunicação abordou-se o comportamento sísmico de estruturas flexíveis multi-apoiadas recorrendo a modelos viscoelásticos com plasticidade perfeita, através do método dos elementos finitos no domínio do tempo, usando o programa Plaxis. Estabeleceu-se também a comparação com resultados obtidos com modelos viscoelásticos lineares, através do método dos elementos finitos no domínio da frequência, usando o programa Flush.

Tendo-se considerado um terreno atrítico, foram analisadas duas situações de cálculo, com módulos de distorção correspondentes a 25% e a 75% de $G_{\text{máx}}$ (G30 e G90, respectivamente). As características dinâmicas do terreno foram definidas a partir de curvas de rigidez e de amortecimento em função do nível de distorção induzido.

Os resultados demonstraram que a resposta sísmica da estrutura e do terreno depende fortemente dos níveis de plastificação a que o maciço fica sujeito, os quais, por sua vez, estão muito dependentes dos parâmetros utilizados.

Com efeito, na análise viscoelastoplástica G30, a plastificação no terreno foi pouco expressiva, donde resultaram acelerações e esforços nas estruturas semelhantes às obtidas em regime viscoelástico linear. Ao invés, na análise viscoelastoplástica G90 ocorreu a plastificação de grandes zonas do terreno, o que provocou um aumento do amortecimento e, por conseguinte, contribuiu para a redução generalizada das acelerações, em relação à análise viscoelástica. A este facto, que, por si só, deveria conduzir a uma redução dos esforços, sobrepôs-se a ocorrência de deslocamentos relativos importantes na parede e nas escoras, originando nestes elementos estruturais um acréscimo muito significativo dos esforços, face à análise viscoelástica. É de salientar que, na zona superior do terreno, chegou a instalar-se o estado passivo.

Em face do exposto, constata-se que a realização de análises no domínio do tempo apresenta como grande limitação, logo à partida, o facto de não ser possível determinar os níveis de distorção que se instalarão, e consequentemente, também não ser possível definir as características dinâmicas a utilizar. E se este problema é significativo com o modelo viscoelástico linear, mais importante se torna com o modelo viscoelastoplástico. Efectivamente, como se demonstrou, uma escolha errada do amortecimento e da rigidez do terreno pode sobrestimar os efeitos da acção sísmica ou, pelo contrário, pode subestimá-los seriamente.

Para além disso, o amortecimento é assumido no Plaxis como constante, o que não é realista, acrescendo ainda que, no caso de análises com menor rigidez do terreno, como é o caso da análise G30, tem-se um amortecimento muito alto ao mesmo tempo que se considera implicitamente também a parcela de amortecimento conferida pela plastificação do solo. Esta conjugação de factores sobrestima o amortecimento do terreno, o que é contrário à segurança.

Contudo, os modelos viscoelásticos apresentam a limitação de, neste tipo de estruturas, conduzirem a deslocamentos simétricos de ambas as paredes, sendo por isso os esforços menores do que numa situação assimétrica, melhor traduzida por modelos com plasticidade.

Assim sendo, face a uma situação de dimensionamento concreta, parece inevitável o recurso a métodos de análise que permitam incorporar a variação das características dinâmicas do terreno em função dos níveis de distorção no terreno, como por exemplo o método linear equivalente, parecendo este bastante adequado para usar como método de referência. Complementarmente, deve recorrer-se à utilização dum programa de elementos finitos no domínio do tempo para a realização dum cálculo viscoelastoplástico, adoptando valores de amortecimento e de rigidez devidamente ponderados, em função dos resultados obtidos através do método linear equivalente – esta ponderação deve ser realizada não só nas imediações da estrutura, mas tendo também em consideração os resultados obtidos em toda a malha de elementos finitos.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Ambrósio, A.C.; Santos, J.A.; Brito, J.M. (2005). *Análise do comportamento sísmico de estruturas flexíveis multi-apoiadas utilizando modelos viscoelásticos*. 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, pp. 191-200.
- [2] Ishibashi, I.; Zhang, X. (1993). *Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay*. Soils and Foundations. Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 33, Nº 1, pp. 182-191.
- [3] Lysmer, J.; Udaka, T.; Tsai, C.; Seed, H.B. (1975). *FLUSH - A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems*. Report nº EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [4] RSAEEP (1983). *Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes*. Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E.P., Lisboa.
- [5] Santos, J.A.; Gomes, R.C.; Antão, A. (2002). *Aplicação de modelos lineares e elastoplásticos na análise dos efeitos locais da acção sísmica*. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 3, pp. 1983-1994.
- [6] Santos, J.A. (2003). *Resposta harmónica de uma camada viscoelástica*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Nº 99, pp. 53-64.